

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DO TEMPO DE PENETRAÇÃO TÉRMICA EM PAREDE COMPOSTA  
DE MÚLTIPLAS CAMADAS DURANTE INCÊNDIOS: UMA ABORDAGEM  
ANALÍTICA E NUMÉRICA

por

Fabício Norberto Rocha Witt

Monografia apresentada ao  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Escola de Engenharia da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, como parte  
dos requisitos para obtenção do diploma de  
Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, setembro de 2022.

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

### CIP - Catalogação na Publicação

Rocha Witt, Fabrício Norberto  
ESTUDO DO TEMPO DE PENETRAÇÃO TÉRMICA EM PAREDE  
COMPOSTA DE MÚLTIPLAS CAMADAS DURANTE INCÊNDIOS: UMA  
ABORDAGEM ANALÍTICA E NUMÉRICA / Fabrício Norberto  
Rocha Witt. -- 2022.

29 f.

Orientador: Felipe Roman Centeno.

Coorientador: Bruno Éttori Bueno.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Incêndio em Compartimento. 2. Flashover. 3.  
Simulação CFD FDS . 4. Tempo de penetração térmica. 5.  
Incêndio de progresso rápido. I. Roman Centeno,  
Felipe, orient. II. Éttori Bueno, Bruno, coorient.  
III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Fabício Witt

ESTUDO DO TEMPO DE PENETRAÇÃO TÉRMICA EM PAREDE COMPOSTA  
DE MÚLTIPLAS CAMADAS DURANTE INCÊNDIOS: UMA ABORDAGEM  
ANALÍTICA E NUMÉRICA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
ENGENHEIRO MECÂNICO  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA  
DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Sperb Bresolin  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Felipe Roman Centeno  
Coorientador: Me. Bruno Éttori Bueno

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Roman Centeno

Prof. Dr. Andres Armando Mendiburu Zevallos

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, setembro de 2022.

## DEDICATÓRIA

Assim como cada batida de meu coração, cada passo que tomo e cada boa palavra que profiro, dedico também este trabalho à minha família, a meus ancestrais e a nosso mais sagrado valor: a verdade. Que sua memória e seu nome sejam uma benção sobre nossa casa.

## AGRADECIMENTOS

A muitos devo agradecimentos por minha trajetória acadêmica, que culmina neste trabalho. Meus maiores, mais sinceros e profundos agradecimentos devo à minha mãe e a meu pai, meus exemplos de sabedoria, inteligência e acima de tudo exemplos de seres com uma essência brilhante e verdadeira.

À minha mãe, Nélia Leiria Rocha Witt, em especial, pelo apoio, compreensão e amparo, por me introduzir à química enquanto ainda infante, por me ensinar a sonhar com os pés no chão, por me mostrar o que é a maior moral e verdadeira ética, por sua visão inteligente, clara e objetiva e por sua inabalável lealdade e defesa do que é justo e verdadeiro. A meu pai, Francisco Witt, por desde pequeno me introduzir ao pensamento científico, à filosofia e à engenharia, por transmitir-me seu apreço e fascínio pela humanidade e sua história, por sempre me manter próximo da natureza e de nossas origens e valores ancestrais, por seu apreço pela simplicidade, autenticidade e espontaneidade. À minha irmã Francine por ser um exemplo de disciplina, excelência e elegância por vezes sobre-humanas, por estar comigo, por vezes literalmente, a cada passo e por sempre encorajar minha jornada acadêmica. Ao meu irmão Francisco por ser um valoroso exemplo de desenvoltura, criatividade, inteligência e audácia, por ser verdadeiro companheiro e parceiro. A ambos agradeço ainda pelo seu apoio emocional e material, sem o qual minha graduação certamente não seria uma realidade.

Agradeço ainda à minha noiva Stéfany Vier Steffen pelo amor, apoio, incentivo, compreensão e paciência ao longo de minha graduação e por ser um exemplo diário de excelência, organização, disciplina e dedicação à família; A meus sogros Jorge e Loreta Steffen por seu carinho e acolhimento. A Eric Del Nery Prado por sua irmandade e nobre amizade, sua disponibilidade, conselhos e pelo seu cuidado e apreço por minha família.

Devo ainda minha gratidão a todos os colegas que ao longo da graduação agiram com nobreza e altruísmo, ajudando a mim e uns aos outros mesmo sob as mais adversas condições. Seu coleguismo, bom humor e verdadeira amizade foram um sopro de vida durante a minha graduação.

## APOIO FINANCEIRO

Agradeço o Laboratório de Dinâmica de Incêndios da UFRGS por me fornecer o uso de sua infraestrutura computacional durante a realização deste trabalho.

Agradeço também ao *National Institute of Standards and Technology* e ao *VTT Technical Research Centre of Finland* pelo desenvolvimento e disponibilização gratuita do excelente programa de simulação de incêndios FDS e ao grupo Thunderhead Engineering por fornecerem gratuitamente licença de uso do programa *PyroSim*, que facilitou grandemente o tratamento dos dados utilizados durante a elaboração deste trabalho.

Witt, Fabrício N.R. Estudo do tempo de penetração térmica em uma parede composta de múltiplas camadas durante incêndios: uma abordagem analítica e numérica. 2022. 25 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

## RESUMO

O *flashover*, também conhecido como incêndio de progresso rápido, é uma das principais causas de morte de bombeiros. A capacidade de prever o início do *flashover* em incêndios em compartimento é útil na projeção de sistemas e métodos de segurança contra incêndios em edificações. Dentre os métodos de predição de *flashover* atualmente existentes na literatura, o método empírico de McCaffrey oferece uma alternativa simples e consistente a outros métodos, onde o tempo de penetração térmica é um dos parâmetros utilizados. No presente estudo avalia-se uma forma analítica de obtenção do tempo de penetração térmica em paredes compostas de camadas homogêneas de múltiplos materiais inédita na literatura atual. O mesmo parâmetro foi obtido através da construção de um modelo numérico de incêndio em compartimento com ventilação natural, baseado nos parâmetros dos experimentos de Steckler. Após validação e comparação com os resultados numéricos e experimentais, conclui-se que a formulação analítica generalizada apresenta considerável capacidade de predição, podendo, portanto, ser utilizada como ferramenta para aumentar a precisão e gama de aplicação do método de McCaffrey.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tempo de penetração térmica, Incêndio em Compartimento, Parede de Múltiplas Camadas, FDS, Incêndio de Progresso Rápido.

Witt, Fabricio N.R. A study of thermal penetration time in a multilayered wall in a fire: an analytical and numerical approach. 2022. 25 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

#### ABSTRACT

Flashover, also known as rapid progress fire, is one of the leading causes of firefighter deaths. The ability to predict the onset of flashover in compartment fires is useful in designing building fire safety systems and methods. Among the flashover prediction methods existing in the current literature, McCaffrey's empirical method offers a simple yet consistent alternative to other methods, using thermal penetration time as one of its parameters. In the present study a novel analytical and computational way of obtaining the thermal penetration time is evaluated, designed for usage considering walls composed of homogenous layers of multiple materials. The same parameter was obtained by building a numerical model in the Fire Dynamics Simulator software of a fire in a compartment with natural ventilation, based on the parameters of Steckler's experiments. After validation and comparison with numerical and experimental results, it was found that the generalized analytical formulation has considerable predictive capacity, being therefore a potentially useful tool to enhance McCaffrey's method precision and scope of application.

**KEYWORDS:** Thermal penetration time, Compartment Fire, FDS, Multilayered Wall, Rapid Progression Fire.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de incêndio em compartimento – modelo de duas zonas (Adaptada de Walton <i>et al.</i> , 2016).....	2
Figura 2. Balanço de energia no modelo de duas camadas (adaptado de Walton <i>et al.</i> , 2016).....	3
Figura 3. Representação gráfica simplificada do compartimento utilizado nos experimentos de Steckler, Quintiere e Rinkinen (1982) e simulado computacionalmente neste estudo. Uma das paredes foi tornada transparente para melhor visualização. ....	6
Figura 4. Análise de sensibilidade de malha. ....	7
Figura 5. Comparação de perfil de temperatura vertical dentro do compartimento dentre dados experimentais e resultados analíticos para dois níveis de refino de malha. ....	9
Figura 6. Porcentagem de variação relativa atingida pela superfície externa em relação a interna, em simulação de 17.920 elementos e tempo de simulação de 9000s. ....	12
Figura 7. Perfil de temperaturas na Parede 1 no caso 4, tempo de simulação de 9000s. ....	13

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Esquema de divisão do domínio computacional e dimensões das malhas .....	8
Tabela 2. Propriedades termodinâmicas dos materiais utilizados nas soluções analíticas e nas simulações. Retiradas de INCROPERA, Tabela A.3, 2007, e Steckler, 1982. ....	11
Tabela 3. Casos de análise, espessura, composição e tempo de penetração obtido analiticamente com analogia RC. ....	11
Tabela 4. Tabela de comparação de resultados analíticos e numéricos de tempo de penetração térmica para seis casos distintos. ....	14
Tabela 5. Resultados dos erros estatísticos do modelo analítico em relação ao numérico. ....	14

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$\dot{Q}$	Taxa de liberação de calor	[kW]
$\dot{m}_g$	Taxa de fluxo de gás através de abertura	[kg/s]
$T_g$	Temperatura da camada superior de gás	[K]
$T_\infty$	Temperatura ambiente	[K]
$q_{perda}$	Transferência de calor radiativa e convectiva líquida da camada superior de gás	[kW]
$h_k$	Coefficiente de transferência de calor efetivo	[kW/m <sup>2</sup> K]
$A_T$	Área total das superfícies que definem o compartimento	[m <sup>2</sup> ]
$t_p$	Tempo de penetração térmica na parede do compartimento	[s]
$t_c$	Tempo característico do incêndio, tempo de duração do incêndio	[s]
$\dot{q}'''$	Termo fonte composto de energia de reações químicas e absorção de radiação	[kW/m <sup>3</sup> ]
$R_t$	Resistência térmica	[K/W]
$C_t$	Capacitância térmica	[J/K]

### Símbolos gregos

$\rho$	Massa específica do sólido	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\delta$	Espessura da parede em análise	[m]
$\alpha$	Difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /s]
$\tau_t$	Constante temporal térmica	[s]

### Abreviaturas e acrônimos

FDS	<i>Fire Dynamics Simulator</i> , programa de simulação CFD
MPI	<i>Message Passing Interface</i> , do inglês, Interface de passagem de mensagens, é um método computacional de comunicação entre núcleos de processamento
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i> , instituto de padronização de medidas e tecnologias dos EUA
VTT	Centro Tecnológico de Pesquisa da Finlândia
Circuito RC	Circuito resistivo capacitivo

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1 Modelo teórico de incêndio em um compartimento .....	2
2.2 Modelo de duas zonas.....	2
2.3 Cálculo da temperatura em incêndios em compartimento.....	3
2.3 Método de McCaffrey, Quintiere e Harkleroad e suas limitações.....	4
2.4 Simulação computacional fluidodinâmica usando <i>Fire Dynamics Simulator</i> .....	5
2.4.1 Equação da condução de calor para um sólido no FDS.....	5
3. CASO DE ESTUDO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	5
3.1 Tempo de penetração térmica em parede composta de múltiplas camadas.....	5
3.2 Validação através de dados experimentais e simulação computacional.....	6
3.2.1 Condições de contorno .....	6
3.2.2 Malha .....	7
3.2.2 Adaptação e otimização da malha para os equipamentos disponíveis .....	8
3.3. Medições de temperatura no interior do compartimento e das paredes.....	8
4. RESULTADOS .....	10
4.1 Dedução de uma formulação para cálculo de $tp$ para paredes compostas de diferentes materiais.....	10
4.1.1 Aplicação da analogia de circuito RC no cálculo do tempo de penetração térmica teórico de paredes compostas .....	11
4.2 Cálculo do tempo de penetração térmica através de simulação computacional .	12
4.3 Avaliação dos erros estatísticos para a formulação analítica.....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	16

## 1. INTRODUÇÃO

*Flashover*, também conhecido como incêndio de progresso rápido, pode ser definido como “uma fase de transição no desenvolvimento de um incêndio em um compartimento no qual as superfícies expostas à radiação térmica atingem sua temperatura de ignição mais ou menos simultaneamente e o fogo se espalha rapidamente pelo espaço, resultando no envolvimento total do compartimento ou da área fechada” (“NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations”, 2022). Este fenômeno é uma das principais causas de morte de bombeiros nos Estados Unidos (“Firefighter Fatalities in the United States in 2012”, 2012). A capacidade de prever o início do flashover é de grande utilidade para o projetista, engenheiro ou outros preocupados com a segurança contra incêndios em edificações (MCCAFFREY; QUINTIERE; HARKLEROAD, 1981) e a realização de previsões mais precisas e de forma mais eficiente pode auxiliar no salvamento de vidas. Tais previsões podem ser realizadas por métodos computacionais e por métodos analíticos.

Os métodos analíticos possibilitam soluções simples e conservadoras, ainda que grosseiras, que podem ajudar um engenheiro a melhor compreender conceitualmente um problema e a determinar se é necessário realizar cálculos mais detalhados utilizando, por exemplo, uma ferramenta de computação fluido dinâmica (JOHANSSON, 2016). Alguns pesquisadores tentaram prever o *flashover* em incêndios em compartimento utilizando a taxa de liberação de calor mínima como parâmetro preditivo e propuseram diferentes fórmulas empíricas e semiempíricas (Babrauskas, 1980; Thomas, 1981; McCaffrey, 1981). Dentre estes destaca-se McCaffrey, 1981, que propôs um método empírico via análise de regressão dos dados de mais de 100 experimentos, tendo esta formulação sido validada e considerada como tendo resultados consistentes com os de outros métodos, exceto para incêndios em pequenos compartimentos (Babrauskas et al., 2013). O autor do método ressalta que a variável que mais pode causar dificuldades àqueles que tentem aplicar sua formulação é o coeficiente de transferência de calor efetiva, devido ao critério de escolha de uma análise de regime permanente ou transiente para obtenção do mesmo. McCaffrey esclarece que tal escolha é baseada na comparação de dois tempos: o tempo característico do incêndio e o tempo de penetração térmica, sendo este o tempo que o pulso térmico demora para chegar à face anterior da parede do compartimento em análise. Este método empírico apresenta uma fórmula para o cálculo do tempo de penetração térmica limitada, aplicável apenas no caso de paredes compostas de um único material. Construiu-se neste trabalho um modelo numérico de um incêndio em compartimento com ventilação natural utilizando-se o programa de simulação fluidodinâmica computacional de código aberto gratuito *Fire Dynamics Simulator* (FDS). O modelo numérico foi construído e validado com base nos experimentos conduzidos por Steckler et al., 1982. Foram consideradas no modelo numérico variações de composição de parede e foram obtidos valores de tempo de penetração térmica para diferentes composições.

O objetivo deste trabalho é demonstrar e validar uma fórmula para o cálculo do tempo de penetração térmica aplicável para paredes compostas de múltiplas camadas de diferentes materiais, por exemplo, a parede de alvenaria de vedação ou estrutural, composta normalmente, por duas camadas externas de cimento e uma camada interna de blocos cerâmicos. A validação desta formulação almeja facilitar o estudo, compreensão e desenvolvimento de sistemas de segurança contra incêndios de futuros pesquisadores, contribuindo com os esforços para preservação das estruturas e da vida humana.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Modelo teórico de incêndio em um compartimento

Para que seja possível calcular ou prever as temperaturas e outras propriedades geradas em um incêndio em compartimento uma forma de descrição ou um modelo deste fenômeno deve ser utilizada. Este modelo é descrito em termos de equações físicas que podem ser resolvidas para prever-se com um certo grau de precisão, por exemplo, a temperatura no compartimento. Tal modelo é, portanto, uma idealização do incêndio em compartimento.

### 2.2 Modelo de duas zonas

Considere que um foco de incêndio começa em um ponto abaixo do teto. Este foco libera energia e produtos de combustão a uma taxa que pode mudar com o passar do tempo. Os produtos de combustão quentes formam uma pluma que, devido a sua fluatibilidade, sobe ao teto acima da fonte de calor. Ao subir, a pluma arrasta consigo ar frio de dentro do compartimento, reduzindo a temperatura da pluma e aumentando sua taxa de fluxo volumétrico. Quando a pluma chega ao teto ela espalha-se sob o mesmo. Quanto a extensão da corrente de gases quentes sob o teto chega às paredes, o fluxo é desviado para baixo e forma uma camada de gases quentes que desce com o tempo, conforme o fluxo da pluma de gases continua. Há uma interface relativamente bem definida entre a camada de gases quentes superior e camada de ar da parte inferior do compartimento.

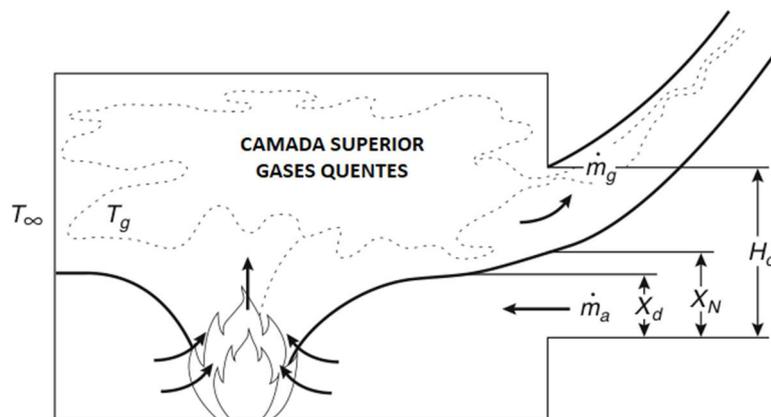


Figura 1. Modelo de incêndio em compartimento – modelo de duas zonas (Adaptada de Walton *et al.*, 2016)

Considera-se que a única troca que ocorre entre o ar da zona inferior e os gases quentes da zona superior se dá através da pluma. Conforme a camada de gases quentes desce e alcança as aberturas do compartimento gás quente flui através das aberturas, enquanto ar do exterior adentra através das aberturas. Esta descrição do fenômeno do incêndio em

compartimento é chamada de modelo de duas camadas, ou modelo de zonas, e assume que ambas as camadas têm temperaturas e composições químicas relativamente homogêneas (QUINTIERE; WADE, 2016).

### 2.3 Cálculo da temperatura em incêndios em compartimento

O princípio básico utilizado para o cálculo da temperatura de um incêndio em compartimento é o da conservação de energia. De forma a estimar-se a temperatura em um compartimento, um balanço de energia pode ser considerado conforme a Figura 2. Balanço de energia no modelo de duas camadas (adaptado de Walton *et al.*, 2016); pode-se então definir, considerando a conservação de energia aplicada à camada superior, de forma simplificada levando em consideração apenas os processos dominantes, que a energia adicionada à camada superior pela chama é igual a energia perdida pela camada quente para as superfícies do compartimento somada a taxa de energia perdida devido a saída de gases pela abertura, conforme Equação 1. A conservação de energia também pode ser aplicada à camada inferior (SPFE, 2015, pg. 998).

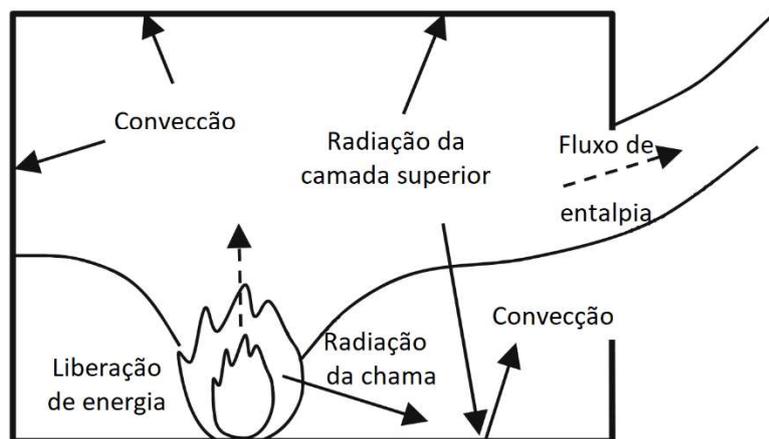


Figura 2. Balanço de energia no modelo de duas camadas (adaptado de Walton *et al.*, 2016)

$$\dot{Q} = \dot{m}_g c_p (T_g - T_\infty) + q_{perda} \quad (1)$$

Onde  $\dot{Q}$  é a taxa de liberação de calor do fogo em  $kW$ ;  $\dot{m}_g$  é a taxa de fluxo de gás através da abertura ( $kg/s$ );  $c_p$  é o calor específico do gás ( $kJ/kg \cdot K$ );  $T_g$  é a temperatura da camada superior de gás ( $K$ );  $T_\infty$  é a temperatura ambiente ( $K$ ) e  $q_{perda}$  é a transferência de calor radiativo e convectivo líquida da camada superior de gás ( $kW$ ).

Na parte esquerda da (1) tem-se a energia gerada pelo incêndio. Na parte direita, o primeiro termo representa o calor transportado da camada superior do fluxo gasoso para fora da abertura, enquanto o segundo termo representa a troca de calor radiativa e convectiva líquida da camada gasosa superior, que é aproximadamente igual ao calor conduzido para as superfícies

do compartimento (“*NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations*”, 2022, pg. 1002). A taxa de calor transferida para as superfícies é aproximada por:

$$q_{perda} = h_k A_T (T_g - T_\infty) \quad (2)$$

Onde  $h_k$  é o coeficiente de transferência de calor efetivo ( $kW / m^2K$ ),  $A_T$  é a área total das superfícies que definem o compartimento ( $m^2$ ).

Substituindo-se a Equação 1 na Equação 2, obtém-se o aumento de temperatura adimensional em termos de dois grupos adimensionais:

$$\frac{\Delta T_g}{T_\infty} = \frac{\dot{Q} / (c_p T_\infty \dot{m}_g)}{1 + h_k A_T / (c_p \dot{m}_g)} \quad (3)$$

Onde  $\Delta T_g$  é o aumento de temperatura da camada superior de gases em relação a temperatura ambiente  $(T_g - T_\infty)(K)$ . Muitas outras equações são utilizadas no cálculo de temperatura em compartimento, porém não serão abordadas neste trabalho.

### 2.3 Método de McCaffrey, Quintiere e Harkleroad e suas limitações

McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981) desenvolveram um método empírico para previsão da temperatura em incêndio em compartimento e da probabilidade de *flashover*. Para isto utilizaram uma expressão de conservação de energia e uma correlação com dados experimentais para desenvolver uma aproximação da temperatura da camada superior de um compartimento, e ressaltam que  $h_k$ , o coeficiente de transferência de calor efetiva, é provavelmente a variável que mais causará dificuldades àquele que tentar prever a temperatura em um incêndio em compartimento via seu método empírico (MCCAFFREY; QUINTIERE; HARKLEROAD, 1981, pg. 19), dada a necessidade de escolha de uma análise considerando equações para regime permanente ou transiente, e esclarece que a resposta para este problema jaz na comparação de dois tempos, o tempo característico do incêndio,  $t_c$ , que nada mais é que o tempo de duração do incêndio, e o tempo de penetração térmica,  $t_p$ , conforme a Equação 4, onde  $\alpha$  é a difusividade térmica do material e  $\delta$  é a espessura da parede do compartimento.

$$t_p = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{\delta}{2} \right)^2 \quad (4)$$

O tempo de penetração térmica, portanto, é uma variável essencial para utilização do método de McCaffrey, porém não é apresentada uma forma de calculá-lo para paredes compostas de camadas de diferentes materiais. Aquele que for usar este método portanto se depara com a limitação de somente conseguir calcular analiticamente o tempo de penetração térmica para paredes compostas de um único material. No artigo de McCaffrey *et al.*, 1981, não é apresentada a origem nem dedução da (4).

## 2.4 Simulação computacional fluidodinâmica usando *Fire Dynamics Simulator*

Fire Dynamics Simulator (FDS) é um simulador de dinâmica de fluidos computacional (CFD) de fluxos térmicos gerados pelo fogo. O FDS resolve numericamente uma forma das equações Navier-Stokes adequada para fluxos térmicos de baixo número de Mach ( $Ma < 0.3$ ) com ênfase no transporte de fumaça e calor (MCGRATTAN; FORNEY, 2022). Este programa permite que o usuário defina variados parâmetros de entrada, desde temperatura e calor específico, até densidade de materiais ou de fumaça, dentre diversos outros parâmetros e dispositivos de medição e controle, como termopares e detectores de fumaça.

O modelo fluidodinâmico utilizado pelo programa se utiliza principalmente da solução de equações de momentum, continuidade e conservação de energia, respectivamente.

### 2.4.1 Equação da condução de calor para um sólido no FDS

A equação unidimensional de condução de calor para a temperatura da fase sólida da simulação  $T_s(x, t)$  é aplicada na direção de  $x$ , com sentido com que aponta para dentro do sólido (o ponto  $x = 0$  portanto representa a superfície do sólido).

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \dot{q}_s''' \quad (5)$$

$\rho_s$ ,  $c_s$ ,  $k_s$  e  $T_s$  representam respectivamente a densidade, calor específico, condutividade térmica e temperatura do sólido.  $\dot{q}_s'''$  é o termo fonte, que leva em conta a energia provinda de reações químicas e absorção de radiação. As propriedades termodinâmicas para o cálculo de um sólido de mais de uma camada são obtidas a partir de uma média das propriedades ponderadas de sua parcela de composição mássica do sólido com um todo (MCGRATTAN, 2022).

## 3. CASO DE ESTUDO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

### 3.1 Tempo de penetração térmica em parede composta de múltiplas camadas

A maioria das edificações contemporâneas possuem paredes compostas por camadas de mais de um material. Alguns exemplos comuns são as paredes de tijolos e cimento, parede de concreto armado, parede de bloco de concreto e parede *dry wall* de gesso cartonado.

Uma equação para obtenção do tempo de penetração térmica em paredes compostas pode facilitar a utilização da fórmula empírica de McCaffrey (1981) para o cálculo de temperatura da camada superior de incêndios em compartimentos, gerando a possibilidade de maior precisão nos cálculos de baixo custo para previsão de *flashover* e aumentando a gama de situações em que os mesmos podem ser aplicados.

O foco principal de estudo deste trabalho, portanto, é a dedução e tentativa de validação de uma fórmula para obter esta variável para paredes com qualquer número de camadas. Na Seção 4 trata-se de uma forma de calcular o tempo de penetração térmica para paredes compostas.

### 3.2 Validação através de dados experimentais e simulação computacional

Steckler, Quintiere e Rinkinen (1982), em Gaithesburg, Maryland, E.U.A., realizaram 55 experimentos de incêndio em compartimento em escala real e até regime permanente para estudar o comportamento dos escoamentos induzidos pelo fogo sob condições características de um incêndio em fase de crescimento e plenamente desenvolvido. Estes experimentos contaram com diversos dispositivos de medição, incluindo medidores de velocidade de escoamento e termopares para medição da temperatura dos gases dentro do compartimento e, os dados obtidos através destes dispositivos foram em parte publicados, junto com os parâmetros do experimento, possibilitando a sua utilização na validação de modelos teóricos e computacionais.

A Figura 3 ilustra uma das configurações de compartimento utilizadas nos experimentos de Steckler, com uma abertura (porta) de 0,74 m de largura e 1,83 m de altura, contando com um queimador de gás metano localizado no centro do compartimento, com 0,3 m de diâmetro e gerando 62,9 kW de calor através de combustão do gás durante seu funcionamento. As paredes do compartimento são originalmente compostas de “fibra cerâmica” isolante, com 0,1 m de espessura (tanto nas paredes quanto no teto e chão), cujas propriedades são descritas na Tabela 2, na sessão seguinte. Esta configuração com queimador centralizado e abertura 1,34 m<sup>2</sup> é a única que será utilizada neste trabalho, variando-se apenas a composição das paredes.

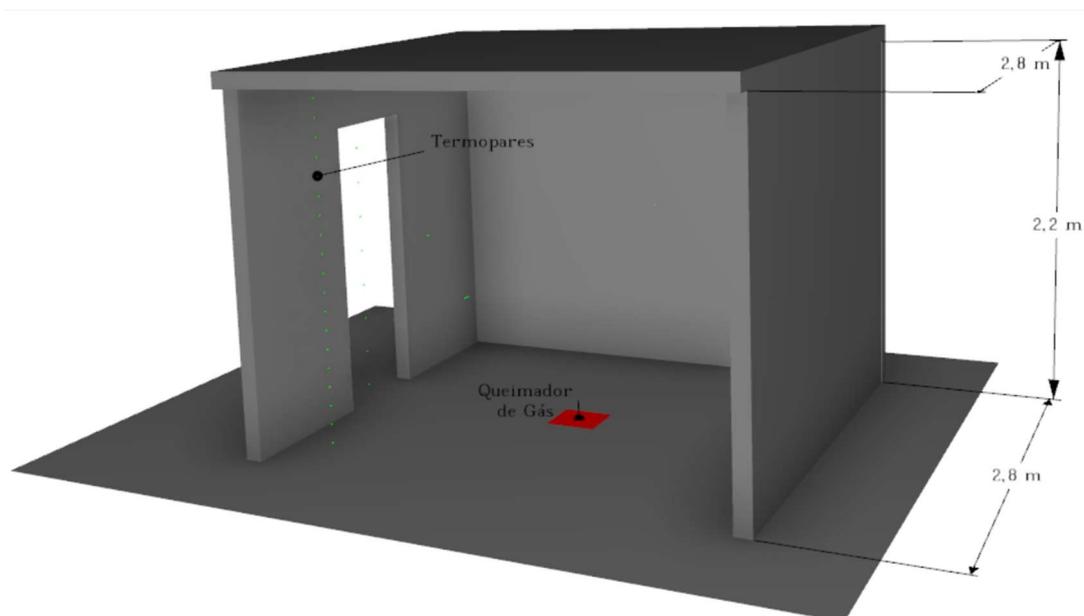


Figura 3. Representação gráfica simplificada do compartimento utilizado nos experimentos de Steckler, Quintiere e Rinkinen (1982) e simulado computacionalmente neste estudo. Uma das paredes foi tornada transparente para melhor visualização.

#### 3.2.1 Condições de contorno

Nas simulações realizadas neste trabalho, utilizou-se as mesmas condições de contorno que foi registrada nos experimentos de Steckler *et al.*, 1982. A temperatura ambiente foi considerada 29,0 °C e a pressão atmosférica utilizada foi de 101325 Pa. Além disso, Wang *et al.*, 2011, recomenda que em uma simulação de incêndio em compartimento com uma abertura o domínio computacional seja expandido ao redor da edificação por uma distância de meio diâmetro efetivo da abertura, sendo este um o valor do diâmetro de um círculo com a mesma área da abertura do compartimento. Este domínio adicional permite que o simulador capture as interações da pluma de gases quentes que sai pela porta do compartimento, aumentando a precisão numérica da simulação. A metade do diâmetro efetivo da porta que foi escolhida na simulação deste estudo equivale a aproximadamente 0,65m, portanto decidiu-se por estender o domínio por 0,7 m ao redor e acima do compartimento.

### 3.2.2 Malha

Já tendo decidido o tamanho do domínio computacional, procedeu-se a escolha do tamanho de elemento que seria utilizado para criar a malha do modelo. Existem diversas formas de se avaliar a resolução ideal da malha de uma simulação numérica. Wang *et al.*, 2011, realizou a validação de exatamente o mesmo modelo que é tratado neste trabalho, e discursa de forma extensa e elaborada sobre as diversas formas de se otimizar uma simulação baseada nos experimentos de Steckler *et al.*, 1982. Segundo este autor, o tamanho de célula que propicia os resultados numéricos mais próximos dos resultados experimentais é de 5 cm. A utilização de um tamanho de célula de 5cm com o domínio escolhido neste trabalho eleva o número de elementos na malha para 483.830 acarretando um aumento de tempo computacional incompatível com as condições de execução do trabalho.

Sendo assim, decidiu-se por realizar uma análise de sensibilidade de malha. Os tamanhos de célula avaliados foram: 2,5 cm, 5 cm, 10 cm e 15cm.

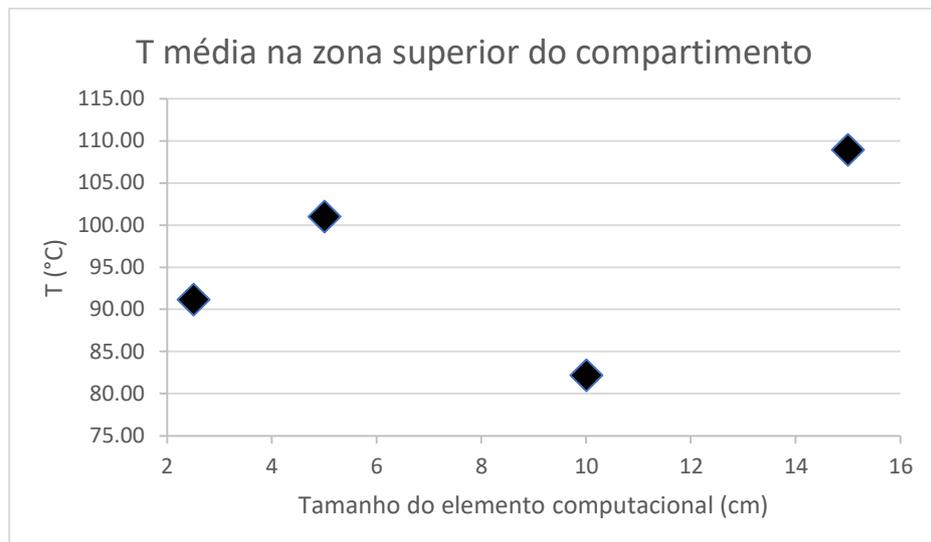


Figura 4. Análise de sensibilidade de malha.

Na Figura 4 vê-se o resultado da análise de sensibilidade de malha. Apesar de ter-se observado uma diferença considerável no valor de temperatura média de gases quentes para a

malha com elemento de 15cm, esta foi a escolhida para a maioria das simulações realizadas neste trabalho, devido ao fato de simulações realizadas com esse tamanho de célula poderem ser executadas em um tempo muito menor, permitindo a variação de parâmetros e experimentação com mais configurações diferentes. Com tamanho de elemento de 15cm o domínio passou a ter um total de 21.504 células.

### 3.2.2 Adaptação e otimização da malha para os equipamentos disponíveis

O FDS possui uma ferramenta para otimização de processamento em computadores que contam com processadores com mais de um núcleo de processamento. A ferramenta utilizada para mediar esta interação entre o FDS e o processador do computador se chama MPI (do inglês *Message Passing Interface*) e foi desenvolvida por um grupo de aproximadamente 60 pessoas de 40 instituições da Europa e dos Estados Unidos (IGNÁCIO; FERREIRA FILHO, 2002) e a utilização correta da mesma combinada com o equipamento adequado pode acelerar consideravelmente as simulações. O FDS só consegue delegar uma malha para cada processador; uma mesma malha contígua não pode ser processada por dois núcleos de processamento diferentes. Portanto, uma forma de conseguir distribuir o domínio de uma simulação entre vários núcleos de processamento é dividindo este domínio em várias malhas.

Os processadores utilizados durante este trabalho foram um Intel i7-12700H de 14 núcleos e um AMD Ryzen 9 5950X de 16 núcleos instalado na estação de trabalho do Laboratório de Incêndios da UFRGS. Nem todos os núcleos de um processador são otimizados para desempenho, por vezes processadores modernos tem parte dos núcleos de processamento otimizados para economia de energia, portanto nem sempre é vantajoso em questão de tempo computacional utilizar todos os núcleos disponíveis.

Foi feito um estudo sistemático do rendimento computacional para números de malhas diferentes, cada uma delegada à um núcleo de processamento. Nos dois processadores o número ótimo foi de 6 malhas, portanto essa foi a divisão realizada no domínio computacional, conforme a Tabela 1, e utilizada para todas as simulações do trabalho.

Dimensões da malha	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malha 6
Nº Células na direção X	22	5	5	22	22	22
Nº Células na direção Y	22	32	32	5	5	22
Nº Células na direção Z	18	21	21	21	21	3
Número total de células	8712	3360	3360	2310	2310	1452
Comprimento (m)	3300	0.75	0.75	3.3	3.3	3.3
Largura (m)	3300	4.8	4.8	0.75	0.75	3.3
Altura (m)	2700	3.15	3.15	3.15	3.15	0.45
Passo de tempo inicial (s)	0.134	0.134	0.134	0.134	0.134	0.134

Tabela 1. Esquema de divisão do domínio computacional e dimensões das malhas

### 3.3. Medições de temperatura no interior do compartimento e das paredes

A temperatura da atmosfera do compartimento foi medida utilizando-se uma coluna de 19 termopares de 26mm de diâmetro, dispostos da mesma forma como no experimento original de Steckler (1982), verticalmente e a 114mm um do outro, conforme visível na Figura 3, juntamente com 8 sensores de velocidade e temperatura adicionados em coluna vertical, com espaçamento uniforme entre eles. Estes dispositivos foram de fato usados apenas para validar a simulação quando comparada com os dados experimentais e com trabalhos anteriores da literatura.

Para a medição do tempo de penetração nas paredes, utilizou-se uma ferramenta do programa FDS que fornece o perfil de temperaturas dentro de um sólido, somada a dispositivos que fornecem a temperatura média de uma superfície e o fluxo de calor ao longo do tempo, estes dispositivos foram colocados no centro geométrico da superfície interna de cada parede e do teto.

### 3.4 Validação do modelo computacional utilizando dados experimentais

Para validar o modelo computacional utilizado, realizou-se uma comparação de perfil de temperatura vertical dentro do compartimento, em regime permanente. Nas simulações computacionais observou-se que o regime permanente começa em aproximadamente 250 segundos de simulação. Como base de dados experimentais, utilizou-se os dados produzidos pelos experimentos de Steckler, 1892, nesse caso especificamente o Experimento 18 mostrado em seu trabalho. A Figura 5, a seguir, mostra com clareza a os perfis de temperatura dos três casos lado a lado: experimental, numérico com malha de 5 cm e numérico com malha de 15 cm. A simulação com malha de 5 cm é claramente mais precisa. Ainda assim, mesmo com a simulação de malha de 15 cm atinge-se considerável nível de precisão de aproximadamente 75%.

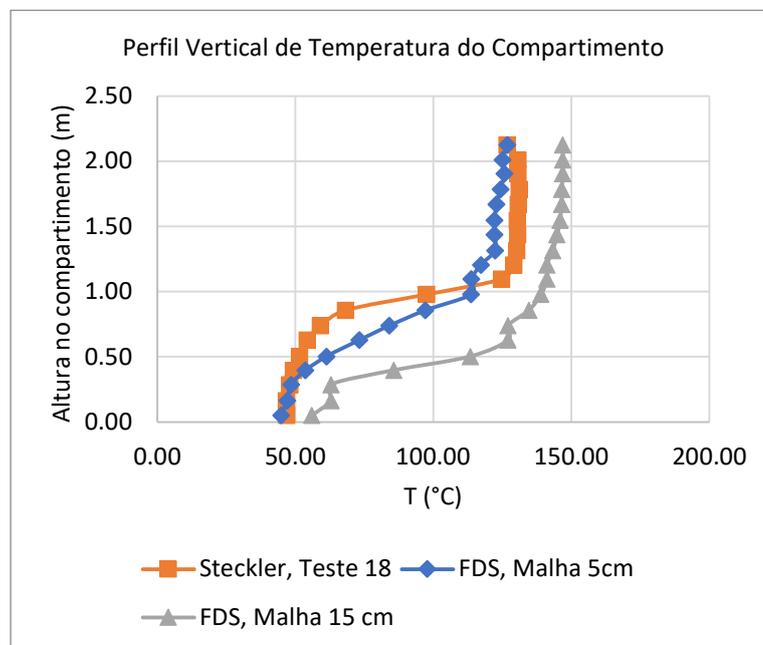


Figura 5. Comparação de perfil de temperatura vertical dentro do compartimento dentre dados experimentais e resultados analíticos para dois níveis de refino de malha.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Dedução de uma formulação para cálculo de $t_p$ para paredes compostas de diferentes materiais

A utilização de modelos analíticos e métodos de parâmetros concentrados (dos quais o método da capacitância global faz parte) podem reduzir grandemente a complexidade da análise térmica de edificações, inclusive compostas de múltiplas camadas, criando a possibilidade de simplificação de problemas que doutra forma teriam de ser resolvidos via ferramentas computacionais de custo e complexidade elevadas (FRAISSE et al., 2002; RAMALLO-GONZÁLEZ, EAMES, COLEY, 2013). Propõe-se a utilização de equações do método da capacitância global na simplificação cálculo do tempo de penetração térmica para uma parede de múltiplas camadas em um incêndio em compartimento, considerando-se a parede do compartimento como um sólido semi-infinito e aplicando-se as devidas considerações características deste método.

Considere a constante térmica temporal,  $\tau_t$ . O método da capacitância global (INCROPERA, 2007, pg. 256, Eq. 5.7) define que a constante térmica temporal pode ser definida em função da resistência térmica e capacitância térmica equivalente do sólido em questão, conforme  $\tau_t = R_t C_t$  (6). No caso de parede composta de camadas verticais homogêneas ao longo de toda sua extensão, tendo fluxo de calor na direção perpendicular à superfície da parede, considera-se que as resistências e capacitâncias térmicas das diferentes camadas estão em série e em paralelo, respectivamente.

$$\tau_t = R_t C_t \quad (6)$$

A resistência térmica e a capacitância térmica agregada para condução unidimensional dentro de parede semi-infinita são dadas pela Equação 7 e Equação 8, respectivamente:

$$R_t = \frac{L}{k} \quad (7)$$

$$C_t = \rho L c_p \quad (8)$$

$$\tau_t = t_p = (R_1 + \dots + R_{n-1} + R_n)(C_1 + \dots + C_{n-1} + C_n) \quad (9)$$

A Equação 9, que fornece o tempo de penetração térmica para uma parede semi-infinita em função de sua espessura e propriedades termodinâmicas, a partir daqui é chamada de “equação da constante temporal térmica RC” e é o objeto de estudo principal deste trabalho e os resultados produzidos pela mesma são validados em comparação com os dados de tempo de

penetração térmica produzidos via simulação computacional fluidodinâmica. Ressalta-se que o método da capacitância global, em seu uso convencional, possui limitações e condições para seu uso adequado. Essas condições não são levadas em consideração neste estudo e aplica-se a (9 sem fazer-se, por exemplo, os testes utilizando o número de Biot que são recomendados na literatura.

#### 4.1.1 Aplicação da analogia de circuito RC no cálculo do tempo de penetração térmica teórico de paredes compostas

No cálculo dos tempos de penetração teóricos foram utilizadas algumas configurações de paredes compostas de diferentes camadas de materiais diversos. As propriedades termodinâmicas dos materiais utilizados estão na Tabela 2, disposta a seguir.

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$k$ [W/(m · K)]	$c_p$ [kJ/(kg · K)]
<b>Reboco</b>	1860,00	0,72	0,78
<b>Tijolo</b>	1920,00	0,72	0,84
<b>Cimento, reboco</b>	1860,00	0,72	0,78
<b>Fibra cerâmica</b>	128,00	0,09	1,04
<b>Gesso, reboco</b>	1440,00	0,48	0,84
<b>Concreto</b>	2280,00	1,8	1,04
<b>Madeira de Pinheiro</b>	640,00	0,14	2,85

Tabela 2. Propriedades termodinâmicas dos materiais utilizados nas soluções analíticas e nas simulações. Retiradas de INCROPERA, Tabela A.3, 2007, e Steckler, 1982.

Foram construídos seis casos distintos de paredes diferentes, contendo de um a dois materiais em sua composição, distribuídos em uma, duas ou três camadas distintas. Os casos foram escolhidos visando-se analisar materiais de construção comuns, em configurações que facilitassem a simulação e os cálculos analíticos e a validação da analogia com circuitos RC.

Caso	Espessura da parede	Composição das camadas	$t_p$ [s] analítico
1	0,1m	Fibra cerâmica 0,1	8125.00
2	0,1m	Concreto 0,1m	3293.33
3	0,1m	Gesso 0,04m* e Tijolo 0,06m	6024.00
4	0,1m	Cimento 0,04m* e Tijolo 0,06m	5355.00
5	0,1m	Aço 0,05m e Concreto 0,05m	2158.79
6	0,1m	Concreto 0,09m e Madeira 0,01m	7032.17

Tabela 3. Casos de análise, espessura, composição e tempo de penetração obtido analiticamente com analogia RC.

## 4.2 Cálculo do tempo de penetração térmica através de simulação computacional

Para obter-se o tempo de penetração térmica via simulação computacional usando o FDS, utilizou-se o critério dado por Karlsson e Quintiere (2000), que define o tempo de penetração térmica como o tempo em que a superfície externa (que está exposta à temperatura ambiente) demora para atingir 15% da variação de temperatura superficial em relação à variação de temperatura que ocorreu na superfície interna, exposta ao fogo. Simulações foram rodadas para cada caso, usando os parâmetros descritos anteriormente, variando-se apenas o tempo de simulação e a composição das paredes, teto e chão do compartimento.

Cada simulação gerou uma vasta quantidade de dados de temperatura nas paredes e em pontos da sala, dos quais foram extraídos os perfis de temperatura de uma superfície a outra das paredes e com eles foram calculados a porcentagem de variação de temperatura transmitida da superfície interna para a externa, utilizando-se a Equação 10. As temperaturas no lado externo e interno (exposto ao incêndio) da Parede 1 e a temperatura ambiente são representadas, respectivamente, por  $T_{ext}$ ,  $T_{int}$  e  $T_{\infty}$ .

$$\frac{\Delta T_{ext}}{\Delta T_{int}} = \frac{T_{ext} - T_{\infty}}{T_{int} - T_{\infty}} = \% \Delta T \text{ transmitida} \quad (10)$$

O instante do tempo em que a porcentagem de variação de temperatura atinge 15% foi considerado o tempo de penetração térmica para dado caso em simulação. Os tempos obtidos para cada caso estão descritos na Tabela 4, onde são comparados com os valores analíticos.

Pode-se observar abaixo na Figura 6 a porcentagem de variação de temperatura transmitida ao longo do tempo entre as superfícies interna e externa da Parede 1 no Caso 4, onde o tempo de penetração térmica foi de aproximadamente 7900 s :

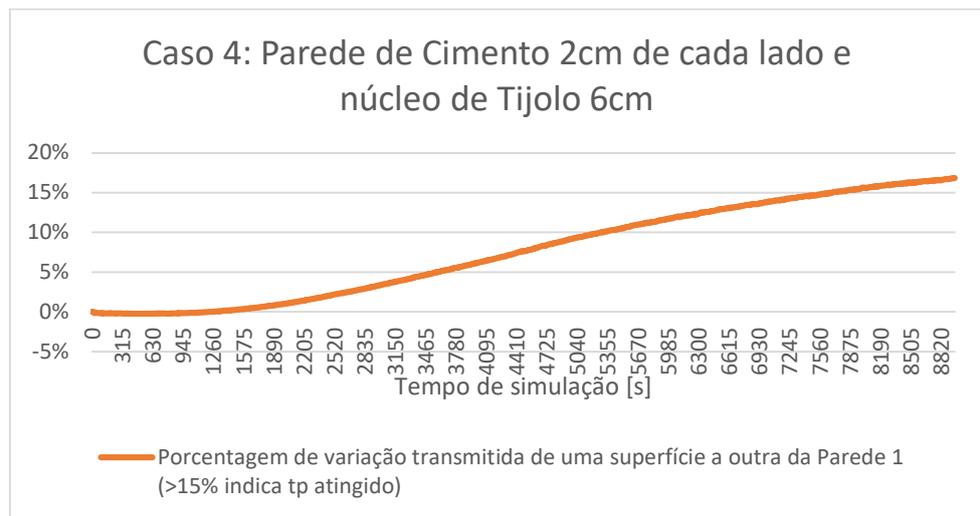


Figura 6. Porcentagem de variação relativa atingida pela superfície externa em relação a interna, em simulação de 17.920 elementos e tempo de simulação de 9000s.

Os perfis de temperatura na parede para tempos diferentes podem ser visualizados na Figura 7. No lado esquerdo do gráfico pode-se ver o aumento de temperatura gradual que ocorre na superfície interna da parede, que está exposta ao fluxo convectivo dos gases quentes gerados pelo queimador de metano de 62,9kW e a radiação gerada pela zona superior de gases quentes que se acumulam no compartimento conforme o incêndio simulado progride.

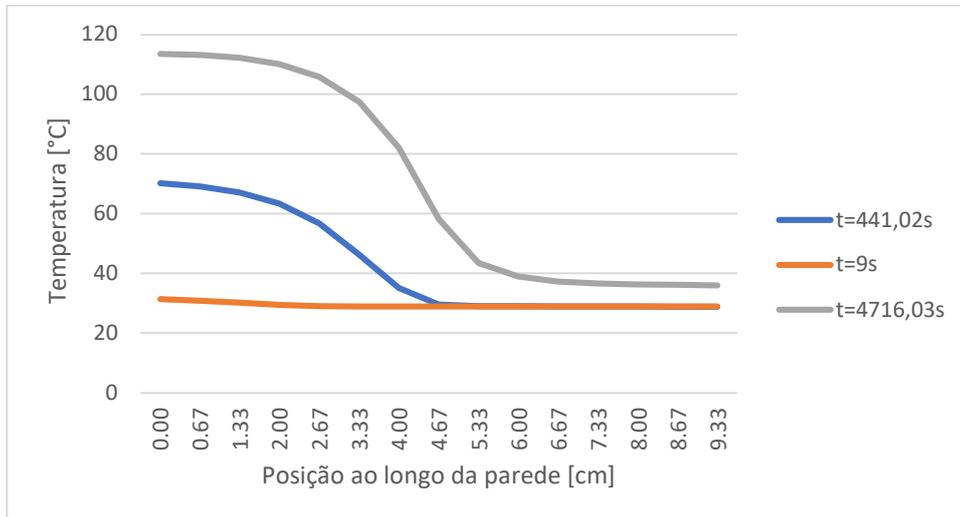


Figura 7. Perfil de temperaturas na Parede 1 no caso 4, tempo de simulação de 9000s.

### 4.3 Avaliação dos erros estatísticos para a formulação analítica

Dos seis casos avaliados, apenas no Caso 1 não se pôde obter um tempo de penetração térmica via simulação. Foi observado que a condução no sólido atinge regime permanente sem que o critério para obtenção do tempo de penetração térmica seja atingido.

Supõe-se que isso se deva ao fato da “fibra cerâmica” utilizada no Caso 1 ser um material com propriedades muito isolantes, com condutividade térmica particularmente baixa e uma espessura de 10cm, de forma que trocas radiativas e convectivas na superfície interna das paredes sejam muito mais intensas do que a condução térmica que acontece dentro do material, ocorrendo então um equilíbrio onde a maior parte da energia absorvida na superfície interna da parede é dissipada ali mesmo, enquanto uma parcela diminuta desta energia é conduzida como calor até a superfície exterior, gerando um pequeno aumento de temperatura ao longo do perfil de condução unidimensional do sólido.

Para os casos de 2 a 5 foi possível obter resultados de tempo de penetração térmica e os valores obtidos pela fórmula analítica de analogia com circuito RC foram comparados com valores obtidos numericamente, obtendo-se os erros estatísticos para a fórmula analítica. O maior desvio ocorreu no Caso 2, com desvio de 14,69%, enquanto o menor desvio ocorreu no Caso 5, com desvio de 0,64%, como pode ser observado na Tabela 4.

Caso	Espessura da parede	Composição das camadas	$t_p(s)$ analítico	$t_p(s)$ simulado	Desvio %
1	0,1m	Fibra cerâmica 0,1	8125,00	-	-
2	0,1m	Concreto 0,1m	3293,33	2874,04	14,59%
3	0,1m	Gesso 0,04m* e Tijolo 0,06m	6024,00	5428,84	10,96%
4	0,1m	Cimento 0,04m* e Tijolo 0,06m	5355,00	4869,12	9,98%
5	0,1m	Aço 0,05m e Concreto 0,05m	2158,79	2145,13	0,64%
6	0,1m	Concreto 0,09m e Madeira 0,01m	7032,17	6237,12	12,75%

Tabela 4. Tabela de comparação de resultados analíticos e numéricos de tempo de penetração térmica para seis casos distintos.

Na Tabela 5 são mostradas a diferença média absoluta, percentual e o valor da raiz do erro quadrático médio (RMSE, do inglês *Root Mean Squared Error*), que é uma medida de dispersão que indica a capacidade de predição do modelo analítico em relação ao numérico. Quanto menor seu valor, maior a capacidade preditiva do modelo analítico.

Diferença Média Absoluta (s)	Diferença Média(%)	RMSE(%)
461,81	10,71%	5,49%

Tabela 5. Resultados dos erros estatísticos do modelo analítico em relação ao numérico.

## 5. CONCLUSÃO

A capacidade de prever as temperaturas e a probabilidade de *flashover* em incêndios em compartimento de forma analítica e simples, como a demonstrada por McCaffrey *et al.*, 1981, pode ajudar engenheiros, técnicos e outros preocupados com a segurança de incêndios a salvar vidas e prever grandes perdas materiais. O método empírico de McCaffrey, porém, possui a limitação de não especificar como se calcular um importante parâmetro do método, o tempo de penetração térmica, em compartimentos ou edificações com paredes compostas de camadas de mais de um material.

Neste trabalho foi proposta uma forma de aumentar a gama de aplicações deste método, deduzindo-se uma equação análoga equação da constante temporal de circuitos elétricos resistivos capacitivos, porém adaptada para um circuito térmico em condição simplificada de condução unidimensional em sólido semi-infinito. Para validação desta equação, foi criado um modelo computacional de simulação de incêndio em compartimento no programa FDS, baseado nos experimentos de Steckler *et al.*, 1982. Foram obtidos resultados de tempo de penetração térmica para seis diferentes casos de estudo utilizando o método analítico e numérico.

A comparação dos resultados analíticos com os numéricos mostrou que o novo método analítico é capaz de obter resultados com surpreendente precisão, obtendo-se erro médio percentual de 10,71% e valor de raiz quadrada de erro médio de 5,49% em relação a valores obtidos numericamente, com tamanho amostral igual a 5. O método analógico aqui apresentado, portanto, se mostra promissor como uma forma extremamente rápida e fácil de obter o tempo de penetração térmica para paredes de mais de uma camada. Quanto as limitações deste estudo, apesar do resultado aparentemente promissor obtido com a utilização da equação de constante

temporal térmica RC aqui apresentada, é importante lembrar que tanto o FDS quanto a fórmula constante temporal apresentada depende de simplificações baseadas em um modelo unidimensional para cálculo de condução térmica em sólidos, que pode se desviar consideravelmente de valores reais que poderiam ser encontrados experimentalmente. Além disso, ressalta-se que a resolução de malha utilizada na maioria das simulações utilizadas neste estudo, que devido a restrições de tempo de computação foi de 15 cm, é diferente do valor ótimo de 5 cm, a partir do qual ocorre independência de malha, como visto na Figura 4. Análise de sensibilidade de malha. Sendo assim, ressalta-se há provável propagação de erros dos resultados gerados pela simulação, gerando incerteza quanto aos erros estatísticos apresentados neste trabalho. Levando em consideração os resultados promissores obtidos com a aplicação da equação de constante temporal térmica RC, é dada como sugestão a realização de futuros estudos adicionais quanto a precisão desta equação na previsão do tempo de penetração térmica utilizando-se um método de modelagem numérica da condução térmica mais realista. Caso utilize-se o mesmo modelo computacional deste trabalho, via FDS, recomenda-se a utilização da resolução de malha ótima de 5 cm, visando minimização de erros, e o teste de um número maior de casos com variação de todos os parâmetros da equação de constante temporal térmica, gerando-se assim um conjunto amostral maior e mais variado de resultados.

Apresentou-se neste estudo, portanto, um novo e mais abrangente método para obtenção do tempo de penetração térmica a ser utilizado em conjunto com o método de McCaffrey, Quintière e Harkleroad (1981), fornecendo-se assim mais uma ferramenta para o estudo, compreensão, prevenção e combate aos incêndios em edificações, contribuindo-se de forma relevante para o salvamento de vidas e propriedade humana.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDRA, T. et al. Influence of heat release rate on the temperature of the hot gas layer in closed spaces. v. 5, n. 1, p. 8, 2020.
- BABRAUSKAS, V. Estimating room flashover potential. **Fire Technology**, v. 16, n. 2, p. 94–103, 1 maio 1980.
- BABRAUSKAS, V.; PEACOCK, R. D.; RENEKE, P. A. Defining flashover for fire hazard calculations: Part II. **Fire Safety Journal**, v. 38, n. 7, p. 613–622, 1 nov. 2003.
- DRYSDALE, D. **An introduction to fire dynamics**. Chichester: Wiley-Blackwell, 2011.
- Effects of rolling and aging on steel alloy**. Disponível em: <[https://www.canva.com/design/DAEviBSVJj8/fNaORDtAU8pf\\_XKmLdrNnA/edit](https://www.canva.com/design/DAEviBSVJj8/fNaORDtAU8pf_XKmLdrNnA/edit)>. Acesso em: 21 ago. 2022.
- Estatísticas - Instituto Sprinkler Brasil**. Disponível em: <<https://sprinklerbrasil.org.br/instituto-sprinkler-brasil/estatisticas/>>. Acesso em: 22 ago. 2022.
- Estatísticas Gerais - Instituto Sprinkler Brasil**. Disponível em: <<https://sprinklerbrasil.org.br/estatisticas-gerais/>>. Acesso em: 22 ago. 2022.
- FEMTC 2011 - Validation of FDS Prediction on Fire-Induced Flow: A Follow-up to Previous Study**, 22 maio 2012. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=rMMWynpFSw>>. Acesso em: 12 set. 2022
- Firefighter Fatalities in the United States in 2012. p. 67, 2012.
- HELFENSTEIN, R. P. Temperatura da camada de gás quente de um incêndio pré-flashover em um multi compartimento considerando a localização do incêndio: desenvolvimento de correlações semiempíricas para a sua previsão. 2021.
- HENSEN, J. L. M.; NAKHI, A. E. FOURIER AND BIOT NUMBERS AND THE ACCURACY OF CONDUCTION MODELLING. p. 10, [s.d.].
- HURLEY, M. J. et al. (EDS.). **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**. 5th ed. 2016 ed. New York, NY: Springer New York : Imprint: Springer, 2016.
- IGNÁCIO, A. A. V.; FERREIRA FILHO, V. J. M. MPI: uma ferramenta para implementação paralela. **Pesquisa Operacional**, v. 22, p. 105–116, jun. 2002.
- INCROPERA, F. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. Hoboken, NJ: John Wiley, 2007.
- JOHANSSON, N. The pre-flashover compartment fire and fire safety engineering – a review of hand-calculation methods. p. 13, [s.d.].
- KARLSSON, B.; QUINTIERE, J. **Enclosure Fire Dynamics**. 0. ed. [s.l.] CRC Press, 1999.
- KEE-CHIANG, C.; YU-LIEH, W.; HSIEN-SHENG, T. Fire Model Analysis and Experimental Validation on Smoke Compartments. **Journal of Fire Sciences**, v. 21, n. 3, p. 203–226, 1 maio 2003.
- MCCAFFREY, B. J.; QUINTIERE, J. G.; HARKLEROAD, M. F. Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations. **Fire Technology**, v. 17, n. 2, p. 98–119, maio 1981.
- MCGRATTAN, K. B. **Fire Dynamics Simulator (sixth edition):: Technical Reference Guide**. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2022. Disponível em:

<<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication1018.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2022.

**NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations.** Disponível em: <<https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=921>>. Acesso em: 22 ago. 2022.

PEACOCK, R. D. et al. Defining flashover for fire hazard calculations. **Fire Safety Journal**, v. 32, n. 4, p. 331–345, 1 jun. 1999.

RANGWALA, A. S.; RAGHAVAN, V. Compartment Fires. Em: RANGWALA, A. S.; RAGHAVAN, V. (Eds.). **Mechanism of Fires**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 177–196.

RASBASH, D. J. Major fire disasters involving flashover. **Fire Safety Journal**, v. 17, n. 2, p. 85–93, 1 jan. 1991.

STECKLER, K. D. et al. **Flow induced by fire in a compartment**. [s.l: s.n.].

**Thermal Penetration Depth - an overview | ScienceDirect Topics.** Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/thermal-penetration-depth>>. Acesso em: 14 ago. 2022.

THOMAS, P. H. Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms. **Fire and Materials**, v. 5, n. 3, p. 103–111, 1981.

VALENCIA-BARBA, Y. E.; GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. **LCA Analysis of Three Types of Interior Partition Walls Used in Buildings**. The Economy, Sustainable Development, and Energy International Conference. **Anais...** Em: THE ECONOMY, SUSTAINABLE DEVELOPMENT, AND ENERGY INTERNATIONAL CONFERENCE. MDPI, 17 jan. 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2504-3900/2/22/1595>>. Acesso em: 16 set. 2022

**Validation of FDS Prediction on Fire-Induced Flow: A Follow-up to Previous Study.** Disponível em: <<https://www.femtc.com/events/2011/d1-17-quintiere/>>. Acesso em: 12 set. 2022.

VELOO, P. S.; QUINTIERE, J. G. Convective heat transfer coefficient in compartment fires. **Journal of Fire Sciences**, v. 31, n. 5, p. 410–423, set. 2013.

WANG, J. et al. P-Flash – A Machine Learning-based Model for Flashover Prediction using Recovered Temperature Data. **Fire safety journal**, v. 122, p. 10.1016/j.firesaf.2021.103341, jun. 2021.

ZHANG, P. et al. The thermal criteria on rubber ignition in flashover fires under longitudinal ventilation surroundings. **Applied Thermal Engineering**, v. 103, p. 1408–1415, 25 jun. 2016.

ZHANG, Y.; WANG, L. Research on Flashover Prediction Method of Large-Space Timber Structures in a Fire. **Materials**, v. 14, n. 19, p. 5515, 23 set. 2021.